

УДК 624.072.002.2

## **Влияние остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах на их устойчивость при действии момента в плоскости большей жесткости**

**Полишко С.Н.**

ООО «Научно-производственное предприятие «Гормаш», Украина

**Анотація.** Розроблена методика і проведені експериментальні дослідження щодо визначення залишкових напружень та їхнього впливу на стійкість при дії моменту в площині більшої жорсткості. Підготовлена практична методика підвищення стійкості зварних двотаврових колон шляхом наплавлення валиків по крайках, у тому числі і на частині довжини колони.

**Аннотация.** Разработана методика и проведены экспериментальные исследования распределения остаточных напряжений и их влияния на устойчивость при действии момента в плоскости большей жесткости. Подготовлена практическая методика повышения устойчивости сварных двутавровых колонн путем наплавки валиков по кромкам, в том числе и на части длины колонны.

**Abstract.** The technique is developed and the experimental researches for definition of residual stress and their influence on stability are carried out at action of the moment in a plane of greater rigidity. The practical technique of increase of stability welded double-tee columns is prepared by welding of rollers, including on a part of column length.

**Ключевые слова:** сварная двутавровая колонна, остаточные напряжения, распределение по сечению, влияние на устойчивость.

**Введение. Постановка проблемы.** Вопросами, связанными с изучением влияния остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС), возникающего в элементах металлических конструкций после изготовления, на их несущую способность продолжительное время занимаются многие как отечественные, так и зарубежные ученые (анализ состояния вопроса приведен в работах [1 – 5]). Интерес к проблеме определяется тем важным обстоятельством, что такое влияние неоднозначно. Можно считать установленным, что остаточные растягивающие напряжения (ОРН) на кромках поясов увеличивают несущую способность сжатых стержней при деформировании в плоскости меньшей жесткости. К сожалению, применительно к внецентренно сжатым элементам, деформирующимся в плоскости большей жесткости, экспериментальных исследований в достаточных объемах не проводилось.

Анализ состояния вопроса, а также отсутствие (кроме работ [2, 5]) данных экспериментальных исследований внецентренно сжатых элементов, де-

формирующихся в плоскости большей жесткости, с учетом влияния остаточного напряженного состояния (ОНС) позволили сформулировать цель и задачи экспериментальных исследований.

**Цель работы.** Экспериментальное подтверждение возможности повышения несущей способности внецентренно сжатых сварных двутавровых элементов, деформирующихся в плоскости большей жесткости, путем локальных термических воздействий.

**Основная часть.** В соответствии с поставленными задачами предусматривалось:

- изготовление экспериментальных образцов (далее образцов) – сварных двутавровых колонн одинаковой площади поперечного сечения с различными видами ОНС. Изменение ОНС выполнялось путем строжки кромок поясов до сварки поясных швов или наплавки сварных швов по кромкам поясов после изготовления;
- проведение сравнительных испытаний изготовленных образцов при одинаковых значениях эксцентриситета приложения вертикальной нагрузки;
- сопоставление результатов испытаний образцов;
- получение экспериментального обоснования предложений по расчету внецентренно сжатых сварных двутавровых колонн с учетом влияния ОНС, возникающего после изготовления (газовой резки при раскрое, сварки поясных швов, наплавки валиков);
- исследование возможности повышения несущей способности колонн за счет наплавки холостых валиков (сварных швов) на части длины;
- использование полученного экспериментального материала для подготовки рекомендаций по расчету внецентренно сжатых двутавровых колонн.

Для решения поставленных задач изготовлены 6 серий образцов длиной 2,8 м по 2 образца в каждой серии. Сечения образцов – пояса (160x8) мм, стенка – (200x6) мм. Материал – сталь марок Ст3 (6 штук) и 09Г2С (6 штук). Первая серия образцов (К1-1, К1-2, К1х-1, К1х-2) изготовлена без строжки кромок поясов перед сваркой, вторая серия (К2-1, К2-2, К2х-1, К2х-2) – со строжкой кромок (с целью ликвидации зон остаточных растягивающих напряжений), третья (К3-1, К3-2, К3х-1, К3х-2) – без строжки, но с наплавкой сварных швов по всем 4 кромкам в центральной части образцов на участке длиной 1,5 м (в маркировке образцов: х – образцы из стали 09Г2С).

В ходе проведения экспериментальных исследований в первую очередь оценивалось влияние остаточных растягивающих напряжений (ОРН), возникающих на кромках поясов при раскрое поясных листов с исполь-

зованием машинной газовой резки. Необходимость подобной оценки обусловлена тем фактором, что в процессе наплавки поясных сварных швов и разогрева изделия возможен отпуск металла поясов и снижение уровня ОРН на кромках. С этой целью выполнялись испытания образцов как со строжкой, так и без строжки кромок поясов.

Следующим этапом исследований являлось изучение влияния ОРН, возникающих после наплавки валиков на кромках поясов на части длины. Сравнение результатов испытаний образцов из одной марки стали в пределах серии при одинаковых эксцентриситетах приложения нагрузки, но с различными видами ОНС, позволило сделать выводы о количественном влиянии ОНС на несущую способность внецентренно сжатых стержней.

Испытания всех образцов выполнялись при одинаковых значениях эксцентриситета приложения внешней нагрузки. Это достигалось за счет использования для всех образцов одинаковых (съёмных) опорных приспособлений.

Все образцы испытывались с обеспечением деформирования в плоскости большей жесткости. Обеспечение деформирования в плоскости большей жесткости достигалось путем испытаний с эксцентриситетом приложения нагрузки 65 мм в этой плоскости и использованием специальных приспособлений, уменьшающих расчетную длину в плоскости меньшей жесткости.

Образцы были изготовлены на ОАО «ДЗМК им. И.В. Бабушкина» из двух листов толщиной 6 и 8 мм каждой марки стали. От каждого листа брались пробы и определялись физико-механические характеристики стали.

Для получения полуфабрикатов листы металла распускались машинной газовой резкой (поясные листы) и на гильотинных ножницах (стеночные листы). Роспуск заготовок поясов образцов серии К1, К1х, К3 и К3х выполнялся машинной газовой резкой без припуска по ширине, а для поясов образцов серии К2 и К2х – таким же образом, но с припуском по ширине +10 мм с последующей строжкой на проектный размер.

Сварка образцов производилась полуавтоматом в среде защитных газов (аргон + углекислый газ) проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм катетом не более 4 мм. В цехе сборосварки после сборки, сварки и правки производилась наплавка валиков по четырем кромкам поясов в средней части на длине 1500 мм.

После изготовления все образцы были измерены. По результатам выполненных измерений установлено, что отклонения в размерах образцов находятся в пределах допусков на изготовление конструкций.

После изготовления в образцах были просверлены отверстия для последующей установки опорных приспособлений.

Испытания изготовленных образцов выполнялись в два этапа. Первым этапом исследований являлись испытания образцов статической нагрузкой при ступенчатом ее возрастании. Вторым этапом было проведение исследований ОНС, возникающего после изготовления.

Испытания образцов первого этапа проводились для определения их НДС при статическом нагружении и оценки степени влияния ОНС, возникшего после изготовления, на несущую способность и деформативность. В задачу исследования входило измерение усилий и деформаций при ступенчатом нагружении.

ОНС, возникающее в образцах после изготовления, определялось методом измерения деформаций через разрушение (разрезку ножовкой) путем освобождения элементов конструкций с остаточными напряжениями после разрыва связей. Применение этого метода позволило произвести разрезку двутавров без значительных тепловых воздействий (результаты этих исследований приведены в работах [1, 4] и здесь не приводятся).

Испытания образцов проводились на гидравлическом прессе ИПС–500. Отсчеты брались по шкале В с пределом измерения от 0 до 250 т с ценой деления 0,5 т. Погрешность измерения не превышала 1 % от величины нагрузки (по данным тарировки прессы). Пресс перед испытаниями тарировался.

Для обеспечения испытаний на ОАО «ДЗМК им. И.В. Бабушкина» были изготовлены специальные опорные приспособления (верхнее и нижнее). Верхнее и нижнее опорные приспособления состоят из двух частей: съемных, устанавливаемых на торцы образцов, и несъемных, устанавливаемых на опорные части тележки и подвижной траверсы прессы. Между съемной и несъемной частями в специально выполненном пазу устанавливался каток для обеспечения шарнирности опор. Уменьшение расчетной длины в плоскости меньшей жесткости было выполнено с помощью специальных приспособлений, установленных на вертикальных направляющих прессы. Общий вид образца в прессе показан на рис. 1.

Съемные приспособления с помощью болтов крепились к образцу. Измерение прогибов во время испытания выполнялось прогибомером ПАО-6.

Все операции по подготовке образцов к испытаниям проводились в такой последовательности:

- образец устанавливался в горизонтальное положение и на торцах монтировались съемные опорные приспособления;
- верхний конец образца подвешивался к подвижной траверсе пресса;
- движением траверсы пресса вверх образец переводился в вертикальное положение и устанавливался на каток нижней опоры;
- образец устанавливался строго вертикально по отвесу, временно закреплялся в вертикальном положении и движением траверсы вниз зажимался через катковые опоры в прессе;
- устанавливался прогибомер и образец был готов к испытанию.

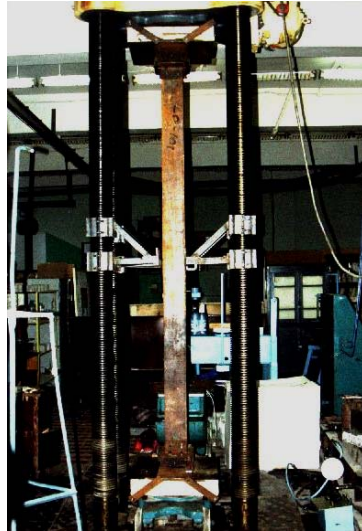


Рис. 1. Общий вид образца в прессе

Центрирование образцов производилось с целью установки по физической оси для обеспечения деформирования без значительных эксцентриситетов в плоскости меньшей жесткости. Для этого образец несколько раз нагружался пробной нагрузкой, составляющей примерно 20 т. При нагружении снимались показания прогибомера и по ним делался вывод о достаточности центрирования. Если показания прогибомера были нестабильными, нагрузка снималась и образец подвергался дополнительной центровке. При стабильных показаниях прогибомера производилось дальнейшее нагружение этапной нагрузкой до потери несущей способности.

Образцы испытывались как внецентренно сжатые стержни с шарнирными опорами. Шарнирность закрепления обеспечивалась установкой строго горизонтально между съемными и несъемными частями опор стальных катков диаметром 30 мм.

Нагружение производилось этапами по 5 т. После достижения этапной нагрузки производилась выдержка не менее 3 минут. Показания прогибомера записывались после приложения этапной нагрузки и выдержки на этапе.

Увеличение этапной нагрузки производилось до исчерпания несущей способности. Интегральной характеристикой исчерпания несущей способности являлся значительный рост прогибов при постоянной нагрузке (достижение максимума на кривой состояния). Нагрузка, соответствующая такому состоянию, считалась предельной.

Процесс исчерпания несущей способности сопровождался пространственной формой потери устойчивости сжатого пояса по двум волнам с точкой перегиба в месте расположения специальных приспособлений для уменьшения расчетной длины. При этом, в процессе деформирования вплоть до исчерпания несущей способности сжатый пояс сохранял плоскую форму.

Все образцы имели остаточный прогиб. В образцах с наплавленными на кромках поясов сварными швами наблюдалась также потеря местной устойчивости сжатого пояса в месте, где заканчивалась наплавка сварного шва (рис. 2).



Рис. 2. Потеря местной устойчивости сжатого пояса образца с наплавленными валиками

После завершения испытаний, снятия прогибомера и сброса давления в прессе образец движением траверсы вверх поднимался над опорной частью, а затем движением траверсы вниз и оттягиванием нижней части пере-

водился в горизонтальное положение. Опорные приспособления снимались и образец укладывался на складское место.

Следующий образец готовился к испытаниям в последовательности, описанной выше.

По данным выполненных исследований первого этапа были построены зависимости «нагрузка–прогиб» («P–f»). Подобные графики (некоторые из таких графиков для образцов из стали марки Ст3 показаны на рис. 3) позволяют наглядно представить процесс деформирования и провести сравнения с результатами расчетов.

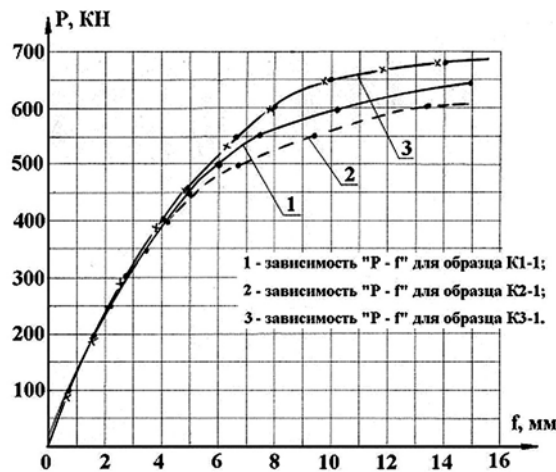


Рис. 3. Зависимости «P–f» для образцов из стали марки Ст3:

К1-1 – образец, изготовленный без строжки кромок;

К2-1 – образец, изготовленный со строжкой кромок;

К3-1 – образец с наплавленными сварными швами на части длины

## Выводы

1. Характер деформирования всех образцов был аналогичным, развитие пластических деформаций и интенсивный рост прогибов начинались с уровня нагружения, соответствующего примерно  $0,8 \cdot P_u$ , где  $P_u$  – нагрузка, при которой несущая способность образца была исчерпана.

2. Интегральной характеристикой процесса исчерпания несущей способности образцов являлся значительный рост прогибов при постоянной нагрузке (достижение максимума на кривой состояния). Нагрузка, соответствующая такому состоянию, считалась предельной, т.е. являлась несущей способностью. Исчерпание несущей способности образцов всех

серий сопровождалось пространственной формой потери устойчивости сжатого пояса по двум волнам с точкой перегиба в центре образца в месте расположения уменьшающих свободную длину устройств. При этом, в процессе деформирования вплоть до исчерпания несущей способности сжатый пояс сохранял плоскую форму. Исчерпание несущей способности образцов с наплавленными по кромкам сварными швами на части длины завершалось потерей местной устойчивости сжатого пояса в месте окончания сварного шва.

3. Для всех серий образцы с наплавленными валиками на части длины показали в среднем на 10 % большую несущую способность, чем образцы со строжкой кромок.

4. Для всех серий образцы без строжки кромок показали несущую способность в среднем на 5...8 % больше, чем образцы со строжкой.

### **Литература**

- [1] Голоднов А.И. К вопросу учета остаточных напряжений в сечениях сжатых двутавровых стержней при их расчетах // Автоматическая сварка. – 2001. – № 5. – С. 8 – 10.
- [2] Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. – К.: Сталь, 2008. – 150 с.
- [3] Голоднов А.И., Полишко С.Н. Методика экспериментальных исследований сжатых стальных стержней, имеющих поля остаточных напряжений // Строительство. Материаловедение. Машиностроение: Сб. науч. тр. / ПГАСиА. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2002. – Вып. 18. – С. 43 – 48.
- [4] Полишко С.Н., Иванов А.П., Голоднов А.И. Экспериментальные исследования внецентренно-сжатых стальных колонн // Метал. конструкции: взгляд в прошлое и будущее: Сб. докл. VIII Укр. науч.-техн. конф. – Ч. 1. – К.: Изд-во «Сталь», 2004. – С. 618 – 623.
- [5] Игнатъева В.С. Метод "фиктивных" температур как основа исследований в области напряженно-деформированного состояния сварных соединений // Металлические конструкции в строительстве: Сб. трудов / МИСИ. – М., 1979. – Вып. 152 – С. 71 – 88.

*Надійшла до редколегії 27.05.2009 р.*